

การทดลองที่ 2

เรื่อง ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอด

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอด โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

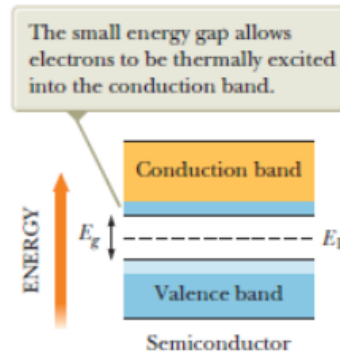
ทฤษฎี

1. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors)

สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบเดียวกับฉนวน แต่มีช่องว่างพลังงานเล็กกว่ามาก โดยมีค่าประมาณ 1 eV ตารางที่ 1.1 แสดงค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุบางชนิด โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแสดงในรูปที่ 1.1 เนื่องจากระดับเฟอร์มีอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และ E_g มีค่าที่เล็กพอที่จะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเกิดการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ และเนื่องจากการมีระดับพลังงานที่ว่าง อยู่มากมายเหนือระดับพลังงานที่ถูกเติมเต็มด้วยปัจจัยจากอุณหภูมิในแถบนำ การป้อนความต่างศักย์ค่าเล็กน้อยก็ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในแถบนำในสถานะพลังงานที่เป็นไปได้ ทำให้เกิดเป็นกระแสในระดับปานกลาง

ผลึก	E_g (eV)	
	0 K	300 K
Si	1.17	1.14
Ge	0.74	0.67
InP	1.42	1.34
GaP	2.32	2.26
GaAs	1.52	1.42
CdS	2.58	2.42
CdTe	1.61	1.56
ZnO	3.44	3.2
ZnS	3.91	3.6

ตารางที่ 1.1 ค่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด

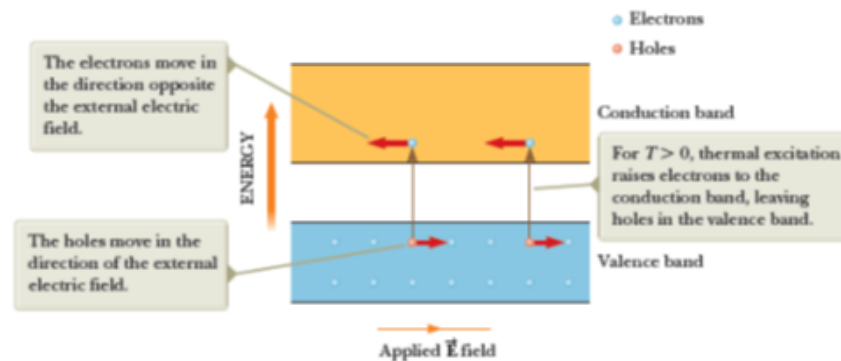


รูปที่ 1.1 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ระดับอุณหภูมิปกติ ($T \approx 300$ K) ค่าช่องว่างพลังงานมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานในฉนวนมาก

ที่ $T = 0$ K, อิเล็กตรอนทั้งหมดในวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในแถบวาเลนซ์ และไม่มีพลังงานที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงาน ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวนำที่ไม่ดีในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ และเนื่องจากการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิให้กับอิเล็กตรอนเพื่อที่จะข้ามช่องว่างแคบๆ มีความเป็นไปได้มากขึ้นที่สถานะอุณหภูมิสูง ค่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยอุณหภูมิ ซึ่งตรงข้ามกับค่าการนำไฟฟ้าในโลหะอย่างยิ่ง ที่จะลดลงอย่างช้าๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำอาจจะเป็นประจุลบ ประจุบวก หรือประจุทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำ อิเล็กตรอนนั้นจะทิ้งที่ว่างเอาไว้ เรียกว่า โฮล (hole) ในแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนตัวอื่นอยู่ โฮลนี้ (บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอน) ประพฤติตัวราวกับเป็นประจุพาหะในลักษณะที่อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณใกล้เคียง สามารถเคลื่อนที่มายังโฮล เมื่อใดก็ตามที่อิเล็กตรอนทำเช่นนั้นจะเป็นการสร้างโฮลใหม่ในตำแหน่งที่อิเล็กตรอนทิ้งมา ดังนั้นผลสืบเนื่องสุทธิสามารถแสดงได้ในรูปของการเคลื่อนที่ของโฮลในเนื้อวัสดุ ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โฮลประพฤติดั้วราวกับว่าเป็นอนุภาคที่มีประจุ $+e$

ผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยธาตุเพียงชนิดเดียวหรือสารประกอบเพียงชนิดเดียว เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก (intrinsic semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและจำนวนโฮลจะเท่ากัน การจับคู่กันของประจุเหล่านี้เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) เมื่อปรากฏว่ามีสนามไฟฟ้าจากภายนอกโฮลจะเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าและอิเล็กตรอนตัวนำจะเคลื่อนที่ในทิศ

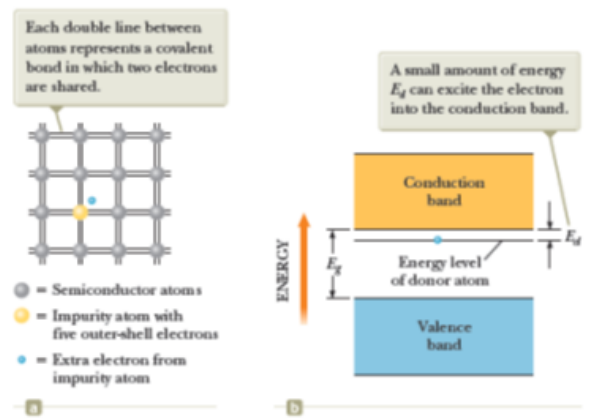
ทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า (รูปที่ 1.2) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน การเคลื่อนที่ของประจุทั้งสองจึงทำให้เกิดเป็นกระแสในทิศทางเดียวกัน



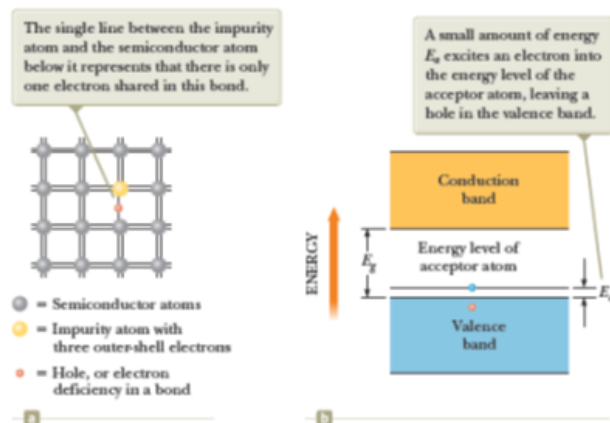
รูปที่ 1.2 การเคลื่อนที่ของประจุ (โฮลและอิเล็กตรอน) ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิกชนิดหนึ่ง

สารกึ่งตัวนำที่ถูกรเจือ (Doped Semiconductors)

เมื่อมีการเติมสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า การเติมสารอื่นผสมลงไปที่เรียกว่า การเจือ (doping) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมค่าการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่อะตอมตัวหนึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดห้าตัว เช่น สารหนู ถูกนำไปเติมให้กับสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุหมู่ IV อิเล็กตรอนสี่ตัวจะจับเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำ และเหลือเป็นอิเล็กตรอนว่างอยู่หนึ่งตัว (รูปที่ 1.3a) อิเล็กตรอนที่เกินมานี้เกือบจะเป็นอิสระกับอะตอมหลัก และเราสามารถสร้างเป็นแบบจำลองโดยให้มีระดับพลังงานเกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานที่ตำแหน่งด้านล่างใกล้กับแถบนำ (รูปที่ 1.3b) การมีอะตอมเพนตะวาเลนต์ (pentavalent atom) ส่งผลให้เกิดการมีอิเล็กตรอนในโครงสร้าง ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็น อะตอมผู้ให้ (donor atom) เนื่องจากกระยะห่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้กับขอบล่างของแถบนำมีค่าน้อย (โดยทั่วไปแล้วมีค่าประมาณ 0.05 eV) ปริมาณการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปสู่แถบนำได้ (จำไว้ว่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ $kBT \approx 0.025$ eV) สารกึ่งตัวนำที่ได้ไปด้วยอะตอมผู้ให้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductors) เนื่องจากเป็นสารที่มีประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ (negatively charged)



- รูปที่ 1.3 (a) ภาพสองมิติของสารกึ่งตัวนำที่ประกอบไปด้วยอะตอมธาตุหมู่ IV (สีเข้ม) และอะตอมสารเจือ (สีจาง) ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดห้าตัว
- (b) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนเกือบเป็นอิสระของอะตอมสารเจืออยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยอยู่ข้างล่างในบริเวณใกล้ๆ ขอบล่างสุดของแถบนำ



- รูปที่ 1.4 (a) ภาพสองมิติของสารกึ่งตัวนำที่ประกอบไปด้วยอะตอมธาตุหมู่ IV (สีเข้ม) และอะตอมสาร (สีจาง) ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัว
- (b) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ระดับพลังงานตัวแทนของอะตอมสารเจือที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัวอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยจะอยู่ข้างบนในบริเวณที่ใกล้ๆ ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์

ถ้าสารกึ่งตัวนำหมู่ IV ถูกโด๊ปด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัวดังเช่นใน อินเดียม (indium) และอะลูมิเนียม (aluminum) อิเล็กตรอนสามตัวจะรวมเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้เคียง เหลือที่ว่างสำหรับอิเล็กตรอนไว้หนึ่งที – โฮลตัวหนึ่ง - ซึ่งจะเป็พันธะที่สี่ถ้ามีอิเล็กตรอนในอะตอมสารเจือมากพอที่จะรวมตัวเป็นพันธะ (รูปที่ 1.4a) ในสถานะการณ์นี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยการวาดระดับพลังงานในช่องว่างพลังงานในบริเวณที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ดังในรูปที่ 1.4b อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ที่มีพลังงานเพียงพอจากอุณหภูมิห้องเข้าไปเติมระดับพลังงานที่ว่างนี้จะเหลือโฮลทิ้งไว้ตัวหนึ่งในแถบวาเลนซ์ โฮลตัวนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ เนื่องจากอะตอมไตรวาเลนต์ (trivalent atom) ได้รับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ สารเจือประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (acceptor atoms) สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปด้วยสารเจือแบบไตรวาเลนต์ (ผู้รับ) มีชื่อว่า สารกึ่งตัวนำชนิด p (p-type semiconductor) เนื่องจากประจุพาหะข้างมากคือโฮลที่มีประจุบวก (positively charged holes) เมื่อการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเป็นผลเนื่องมาจากสารเจือผู้รับหรือสารเจือผู้ให้ วัสดุนั้นจึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค (extrinsic semiconductor) ช่วงความหนาแน่นของสารเจือทั่วไปสำหรับสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิคคือ 10^{13} ถึง 10^{19} cm^{-3} ขณะที่ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำทั่วไปมีค่า 10^{21} cm^{-3} โดยประมาณ

2.อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

อิเล็กทรอนิกส์ในช่วงครึ่งแรกของศตวรรษที่ 20 นั้นสร้างจากหลอดสุญญากาศ ซึ่งทำงานโดยการผ่านอิเล็กตรอนไปในบริเวณที่ว่างระหว่างแคโทด (cathode) และแอโนด (anode) ทรานซิสเตอร์ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1948 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการใช้หลอดสุญญากาศ ไปสู่การใช้สารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในยุคอิเล็กทรอนิกส์นี้ได้ดำเนินมาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายสิบปี ในยุคต่อไปของอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตอันใกล้นี้จะมีการนำอุปกรณ์จากนาโนเทคโนโลยี เช่น ควอนตัมดอต (quantum dots) และโครงสร้างนาโนแบบอื่นๆ (nanoscale structures) มาใช้แทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดิม

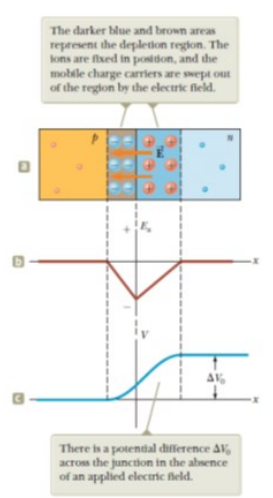
ในการทดลองนี่จะเป็นการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อ ซึ่งยังคงมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และจะยังคงใช้งานต่อไปในอนาคตอีกเป็นเวลาหลายปี

ไดโอดแบบรอยต่อ (The Junction Diode)

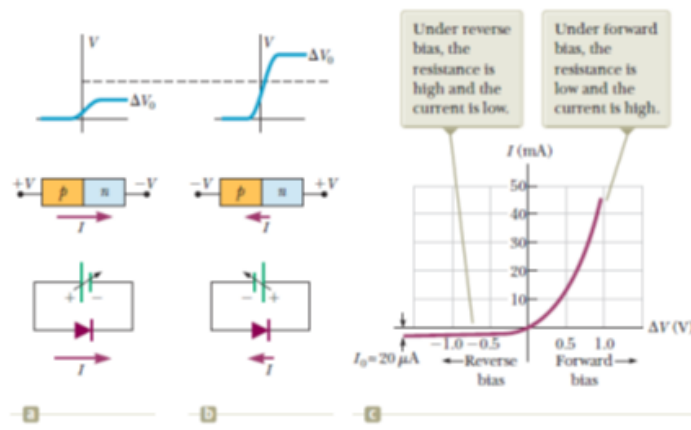
หน่วยพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำถูกสร้างขึ้นจากการเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำชนิด p กับสารกึ่งตัวนำชนิด n ให้เกิดเป็น รอยต่อ p-n (p-n junction) โดย ไดโอดแบบรอยต่อ (junction diode) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่

เกิดจากรอยต่อ p - n รอยต่อเดียว บทบาทการทำงานของไดโอดชนิดต่างๆ ก็คือ การที่สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าได้ในทิศทางหนึ่ง และไม่สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าได้ในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นไดโอดจึงประพฤติตัวเป็นวาล์วให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ทางเดียว

รอยต่อ p - n ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 1.5a ประกอบด้วยส่วนสำคัญที่อยู่ในสามบริเวณ: บริเวณ p บริเวณ n และบริเวณส่วนขยายในระดับหลายไมโครเมตรไปสู่ในแต่ละด้านของรอยต่อที่เรียกว่า *บริเวณดีพลีชัน* (depletion region) บริเวณดีพลีชันอาจมองได้เป็นบริเวณที่เกิดจากสองบริเวณของรอยต่อที่เชื่อมกัน อิเล็กตรอนผู้ให้จากด้าน n ที่เป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้ที่อยู่ใกล้กับรอยต่อ (พื้นที่สีเข้มด้านขวามือในรูปที่ 1.5a) แพร่เข้าไปสู่ด้าน p และเข้าเติมเต็มกับโฮลที่อยู่ในบริเวณนั้น เหลือทิ้งไว้เพียงไอออนบวกที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อกระบวนการนี้เกิดขึ้นเราก็สามารถจำลองแบบโฮลที่ถูกเติมเต็มด้วยกระบวนการแพร่เข้าสู่ด้าน n เหลือทิ้งไว้เป็นบริเวณ (พื้นที่สีเข้มด้านซ้ายมือในรูปที่ 1.5a) ไอออนลบที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากทั้งสองด้านของบริเวณดีพลีชันในแต่ละด้านเกิดเป็นประจุสุทธิที่ค่าสนามไฟฟ้าภายในอยู่ในช่วง 10^4 ถึง 10^6 V/cm เกิดขึ้นที่บริเวณดีพลีชัน (ดูรูปที่ 1.5b) สนามไฟฟ้านี้ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากับประจุพาหะเคลื่อนที่ได้ที่ตกลงเหลืออยู่ให้ออกไปจากบริเวณดีพลีชัน ดังชื่อที่ตั้งให้กับบริเวณนี้เนื่องจากเป็นบริเวณที่ปลอดจากประจุพาหะเคลื่อนที่ได้ สนามไฟฟ้าภายในนี้ทำให้เกิดเป็นความต่างศักย์ภายใน (ΔV_0) ที่ป้องกันการแพร่ต่อไปของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และทำให้กระแสในรอยต่อเป็นศูนย์เมื่อไม่มีการป้อนความต่างศักย์จากภายนอก



- รูปที่ 1.5**
- (a) การจัดเรียงทางกายภาพของรอยต่อ p - n
 - (b) องค์ประกอบ E_x ของสนามไฟฟ้าภายใน เทียบกับ x ของรอยต่อ p - n
 - (c) ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน (ΔV_0) เทียบกับ x ของรอยต่อ p - n



รูปที่ 1.6 (a) รอยต่อ p - n รอยหนึ่งภายใต้สภาวะไบอัสตรง แผนภาพตรงกลางแสดงให้เห็นศักย์ไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับแต่ละปลายของรอยต่อ ภาพล่างเป็นแผนภาพวงจรไฟฟ้าแสดงให้เห็นแบตเตอรี่ที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ แผนภาพบนแสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงข้ามรอยต่ออย่างไร เส้นประแสดงความต่างศักย์ภายใต้สภาวะของรอยต่อที่ไม่มีการไบอัส

(b) เมื่อแบตเตอรี่ต่อกลับทิศ และรอยต่อ p - n อยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับ กระแสจะมีค่าน้อยมาก

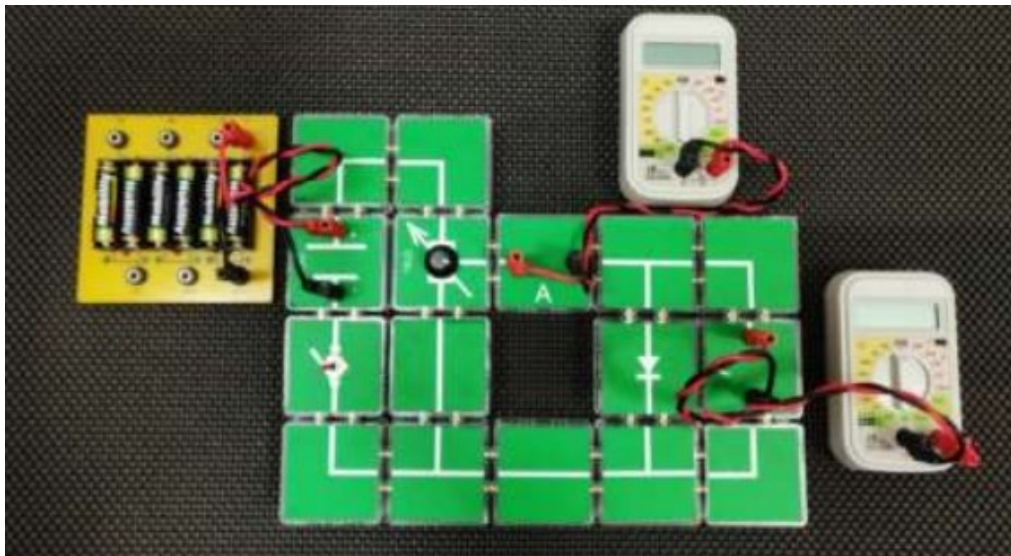
(c) กราฟคุณลักษณะจริงของรอยต่อ p - n

การทำงานของรอยต่อในฐานะเป็นไดโอดสามารถเข้าใจได้ง่ายที่สุดด้วยการพิจารณารูปความต่างศักย์ที่แสดงในรูปที่ 1.5c ถ้าแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่ง (ΔV) ถูกป้อนให้กับรอยต่อในลักษณะที่ด้าน p ต่อกับปลายบวกของแหล่งจ่ายแรงดันดังที่แสดงในรูปที่ 1.6a ความต่างศักย์ภายใน (ΔV_0) คร่อมรอยต่อนั้นจะลดลงดังที่ได้แสดงในภาพบน การลดลงของความต่างศักย์นี้ส่งผลในรูปของกระแสที่มีการเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลกับค่าแรงดันตรงที่เพิ่มขึ้น หรือ ไบอัสตรง (forward bias) ในส่วนการไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) (เมื่อด้าน n ของรอยต่อต่อเข้ากับปลายบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า) ความต่างศักย์ภายใน (ΔV_0) จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มการไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 1.6b การเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นี้ส่งผลในรูปของกระแสน้อยลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถมีค่าถึงค่าอิ่มตัว (saturation value) I_0 ได้อย่างรวดเร็ว ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของไดโอดในอุดมคติคือ

$$I = I_0(e^{\frac{q\Delta V}{k_B T}} - 1) \quad (1.1)$$

เมื่อ q เป็นตัวแทนของขนาดประจุอิเล็กตรอน k_B คือค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ รูปที่ 1.6c แสดงกราฟคุณลักษณะ I - ΔV ของรอยต่อจริง p - n ซึ่งแสดงให้เห็นคุณสมบัติของไดโอด

ดังนั้นในทางอิเล็กทรอนิกส์จึงนิยมนำไดโอดมาสร้างเป็นวงจรที่ใช้กำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เช่น สร้างเป็นวงจรเรียงกระแสเพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาการต่อวงจรไดโอดแบบ forward bias พร้อมทั้งสร้างกราฟ I - V เพื่อแสดงลักษณะเฉพาะของไดโอด

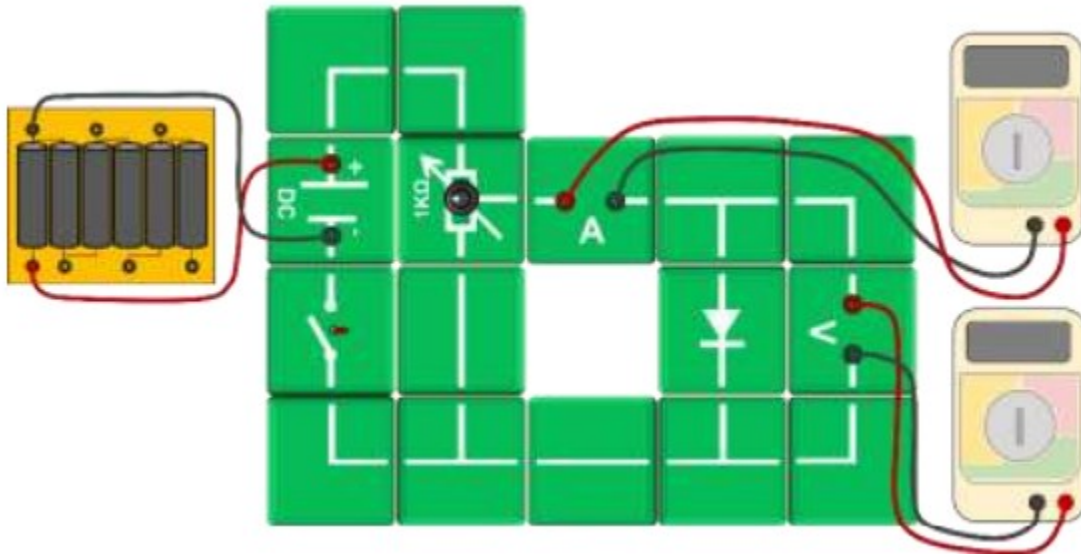


อุปกรณ์

- | | | |
|---|---|------|
| 1. ชุดวงจรไดโอด | 1 | ชุด |
| 2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (ใช้วัดกระแสและแรงดัน) | 2 | ตัว |
| 3. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง | 1 | ตัว |
| 4. สายไฟ | 6 | เส้น |

วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 วงจรการทดลองไดโอด

2. ต่อวงจรไดโอดเป็น forward bias
3. ขณะปิดสวิตช์ ถ้า โวลต์มิเตอร์ไม่อ่านค่าเป็นศูนย์ให้ปรับตัวต้านทานจนกระทั่งโวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้ศูนย์
4. สลับสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง ON ค่อยๆ ปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ จนกระทั่งโวลต์มิเตอร์ (V_D) อ่านค่าได้ 0.05 V อ่านค่ากระแสไฟฟ้า (I_D) บันทึกผลลงในตาราง
5. ปรับค่าความต้านทานไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความต่างศักย์ (V_D) เป็นไปตามตารางบันทึกผล อ่านค่า I_D ที่ได้ (ห้ามหมุนตัวต้านทานจนค่า V_D เกิน 0.75 V) ทำซ้ำ 3 ครั้ง
6. เขียนกราฟระหว่าง I_D - V_D ให้ I_D เป็นแกน y และ V_D ให้เป็นแกน x สังเกตลักษณะกราฟที่ได้

บันทึกผลการทดลองที่ 2
ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอด

V_D (V)	I_D (mA)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0
0.20	0	0	0	0
0.25	0	0	0	0
0.30	0	0	0	0
0.35	0	0	0	0
0.40	0.001	0.001	0.001	0.001
0.45	0.003	0.003	0.004	0.003
0.50	0.009	0.009	0.009	0.009
0.55	0.026	0.024	0.023	0.024
0.60	0.058	0.059	0.061	0.059
0.65	0.140	0.137	0.137	0.138
0.70	0.307	0.302	0.306	0.305

วิธีการคำนวณ

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง